

普光气田飞仙关组一、二段欠压地层应用 绒囊钻井液的可行性分析

王子涵¹, 王介坤^{2*}

(1. 中海石油(中国)有限公司天津公司质量健康安全环保部, 天津 300450; 2. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘要: 普光气田主力产层飞仙关组一、二段经二十余年开采, 其压力系数已降至0.60~0.70, 而其上、下的飞三段和长兴组目前都为原始地层压力, 压力系数分别为1.20、1.10, 形成了相对的高-低-高的压力系统。第二层技术套管封过飞三段, 如果在飞一、二段欠压层使用1.03~1.05 g/cm³的常规水基低密度钻井液, 则可能会发生严重漏失、压差卡钻、污染主体产层等复杂情况。为了不影响飞一、二段主产层的生产, 本文从防漏、堵漏、应用井深5115 m、随钻封堵等方面进行了可行性分析, 建议采用绒囊钻井液+随钻封堵方式钻穿该层。

关键词: 欠压地层; 绒囊钻井液; 随钻堵漏; 可行性分析; 飞仙关组一、二段; 普光气田

中图分类号: TE254; P634.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0318-05

Feasibility analysis of fuzzy-ball drilling fluid applied in under-pressured strata of the First and Second Member of Feixianguan Formation, Puguang Gas Field

WANG Zihan¹, WANG Jiekun^{2*}

(1. *Quality, Health, Safety and Environment Department, CNOOC China Limited-Tianjin, Tianjin 300450, China;*
2. *Drilling Technology Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Services Co., Ltd., Dongying Shandong 257017, China*)

Abstract: After more than 20 years of production, the pressure coefficient of the main pay zone (First and Second Member of Feixianguan Formation) of Puguang Gas field has been dropped to 0.60~0.70. However, the overlying Third Member of Feixianguan formation and underlying Changxing Formation are still maintaining virgin formation pressure with the pressure coefficient of 1.20 and 1.10 respectively, which forms a relatively high-low-high pressure system. The second intermediate casing penetrates through the Third Member of Feixianguan formation. If conventional low-density water-based mud with a density of 1.03~1.05 g/cm³ is adopted in the under-pressured intervals of the First and Second Member of Feixianguan formation, severe drilling complications such as lost circulation, differential pressure sticking and formation damage to the main pay zone may still occur. To avoid adverse impacts on production, in this paper, a feasibility analysis was carried out covering lost circulation prevention, plugging, operational depth of 5115 m and sealing while-drilling, it is recommended that the formation should be penetrated by combining fuzzy-ball drilling fluid with sealing while-drilling technology.

Key words: under-pressured formation; fuzzy-ball drilling fluid; sealing while-drilling; feasibility analysis; First and Second Member of Feixianguan Formation; Puguang Gas Field

收稿日期: 2026-06-13; 修回日期: 2026-07-23 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.041

第一作者: 王子涵, 男, 汉族, 1992年生, 工程师, 地质学专业, 硕士, 从事海洋油气开采安全工作, 天津市滨海新区海川路2121号, wangzh@cnooc.com.cn。

通信作者: 王介坤, 男, 汉族, 1967年生, 高级工程师, 石油工程专业, 从事钻井设计及方案工作, 山东省东营市东营区北一路827号, 195439612@qq.com。

引用格式: 王子涵, 王介坤. 普光气田飞仙关组一、二段欠压地层应用绒囊钻井液的可行性分析[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 318-322.

WANG Zihan, WANG Jiekun. Feasibility analysis of fuzzy-ball drilling fluid applied in under-pressured strata of the First and Second Member of Feixianguan Formation, Puguang Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 318-322.

1 地质概况

普光气田在普光303平台老井场部署了一口开发定向井普光303-4井,用来开发长兴组礁体,设计垂深5115 m,井深5290.71 m,井斜35.5°。长兴组礁体未曾动用,地层压力仍为原始状态。预测新钻长兴组气层中深(垂深5075 m)地层压力55.83 MPa,温度125.5℃,压力系数1.10。

钻达长兴组,必须穿过主产层飞仙关组一、二段,而飞一、二段经二十余年开采,其压力系数已降至0.60~0.70,而其上的飞三段压力系数为1.20,飞三段-飞一、二段-长兴组形成了相对的高-低-高的压力系统。

飞一、二段储层物性变化较大,总体属低孔、低渗,部分达到中孔、高渗,但对采气贡献率大的还是大孔隙。普光气田裂缝发育是有选择特征的,在物性较好的Ⅰ、Ⅱ类储层段,裂缝不太发育,且以低角度缝为主,储层段以孔隙型为主。

2 钻井液方案难点

井身结构采用四开次方案,在进入飞二段气层前,下入 $\varnothing 193.7$ mm的第二层技套封隔飞三段及以上地层。四开在飞一、二段钻进时采用低密度钻井液,尽可能减少对气田主产层的污染;在钻穿飞一、二段产层后,提高地层承压能力,而后继续用 $\varnothing 165.1$ mm钻头、密度1.17~1.25 g/cm³的钻井液钻进长兴组至设计井深。

钻进飞一、二段欠压地层,钻井液的首要任务是防漏和保护储层。即使用常规水基低密度1.03~1.05 g/cm³的钻井液,也可能会发生严重漏失、压差卡钻、污染产层等复杂情况。对与压力系数0.60~0.70匹配的低密度钻井液进行了调研,见表1。经过成本、工艺、环境等对比,重点对绒囊钻井液进行可行性分析。

表1 低密度钻井液类型

低密度钻井液类型	密度/(g·cm ⁻³)	特 殊 设 备	备 注
油基类钻井液	≥0.90	无	环境要求高,初始成本高。金龙4井深4250 m ^[1]
高强漂珠低密度钻井液	0.77~0.95	无	成本高
充气钻井液	0.60~0.99	充气设备	成本高
充(氮)气可循环泡沫钻井液	0.50~0.99	制氮、充(氮)气设备、特殊消泡设备	成本高,分1井由于排污池满而结束 ^[2]
可循环蓄能液气泡钻井液	0.35~0.99	雾泵、蓄能液气泡发生装置	尚未中试
早期可循环泡沫钻井液	0.60~0.99	无	成本低,茨119井深4450 m ^[3]
绒囊钻井液	0.75~1.40	无	成本低,最深井曙古172井 ^[4] 井深4684 m

3 绒囊钻井液特点及作用机理

3.1 绒囊钻井液特点

绒囊钻井液,是可循环泡沫钻井液的一种,比早期可循环泡沫钻井液和微泡钻井液防漏堵漏能力更强,还具有提高机械钻速和稳定井壁等功能。绒囊钻井液主要由成核剂、成膜剂、囊层剂、绒毛剂等专用处理剂配制而成。

绒囊钻井液以水(或盐水或固相颗粒水或油)为连续相,通过表面活性剂、聚合物处理剂的物理、化学作用,自然产生的粒径15~150 μm、壁厚3~10 μm的绒囊为分散相,形成稳定的气液固分散体系。除了密度0.75~1.40 g/cm³可调外,还具有自匹配漏失通道高效防治漏失的功能,强剪切稀释性有效悬浮携砂,自脱壳解除堵塞长效保护储层等特点^[5]。

绒囊钻井液与应用其他充气类可循环泡沫钻

井液的根本区别,是不需要附加特殊设备,就可以实现一定体积的气体稳定存在于钻井液中。

该体系功能多,适应性强,既可用于低压碳酸盐岩地层,又可用于低压、低渗泥页岩储层及含盐层;既可用于海上钻井又可用于高温深井,具有很好的抗盐、抗高温能力,抑制防塌性能好,能够解决低压层漏失问题,很好地发现和保护油气层。同时对MWD和泥浆马达等井下工具影响小,配制简单,润滑性能好,毒性极低,易生物降解,对环境影响小。

3.2 绒囊微观结构

绒囊微观结构为“一核、二层、三膜”^[6]。一核为气核,二层为高黏水层、浓度过渡层,三膜为表面张力降低膜、高黏水层固定膜、水溶性改善膜,见图1。绒囊微观结构静态内部似气囊,外部似绒毛,遂称

为“绒囊”,所形成的钻井液称绒囊钻井液。

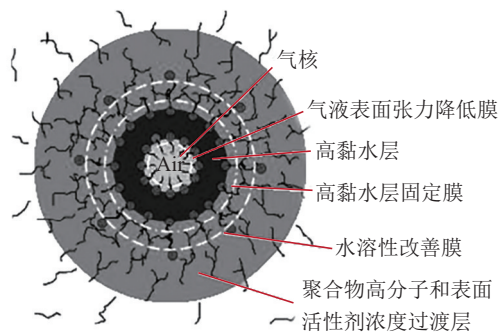


图1 绒囊微观结构

3.3 绒囊钻井液防漏、堵漏机理

简单来说就是低密度缓解井漏,低摩阻降低泵压,高黏度和高切力阻止井漏,“气锁”阻止井浆继续流动,具有“气锁”和“架桥”封堵双重作用,还可以提高地层承压能力^[7]。

3.4 封堵机理

在绒囊封堵地层的流动过程中,其大小、形状和聚集形式随环境变化而变化,与其同时存在的连续相共同作用,形成了性能独特的自匹配封堵技术。对于不同孔隙的地层,绒囊的作用机理有3种^[6,8]:(1)封堵大漏失通道地层依靠绒囊膨胀,形成非均一的堆积效应;(2)封堵裂缝或孔喉半径接近绒囊半径的地层时,大量的绒囊聚集在一起进行叠加,防漏堵漏;(3)对低孔低渗地层,依靠可循环绒囊工作液低剪切速率下的高黏度,在井壁形成黏膜效应,骤增流体进入地层时的阻力,使钻井液侵入地层的速度降低,实现地层封堵。

无论绒囊钻井液在井下遇到何种漏失通道,都能通过自行调节性能,全面封堵漏失地层,称为“自匹配绒囊封堵”^[6]。刚性、柔性材料封堵,利用自身的强度形成“隔墙”阻挡流体进入地层;绒囊封堵,利用漏失地层自身的压力、温度、漏失通道形状,结合自身的高黏度、可变形,阻止流体漏失。绒囊钻井液封堵方式的多样化,很好地适应了地下漏失通道的多样性,因而封堵效果明显。

4 应用可行性分析

可循环泡沫钻井液早在1996年于胜利油田成功研究应用,国外1998年研制出类似的可循环泡沫的Aphrons钻井液。在可循环泡沫钻井液研究应用

初始阶段,钻井液密度可控制在 1.00 g/cm^3 左右,用于井深1000 m以内效果较为明显;井深超过1500 m时,循环密度接近基液密度。随着研究的深入及配方的改进,可循环泡沫类钻井液的应用井深已超过了室内预测的井深极限。在无法解释应用过程中“为什么会比预想的要深”的时候,2008年底,郑力会等^[7]提出了“一核、二层、三膜”理论,而之前国内外都是“一核、一层、三膜”理论。

经过30年的发展,可循环泡沫类流体已在全国多个油气田成功应用。前15年,应用于传统油气钻井方面的研究居多;自“绒囊”概念提出后,绒囊钻井液应用深度越来越深,在煤层气钻井方面的研究应用超过了传统油气钻井。最近10年,绒囊流体应用于修井、压裂方面的研究已经超过钻井,主要是老井开采多年后压力下降、修井漏失严重。

前文已经提到,飞一、二段地层欠压,使用常规水基低密度钻井液可能会发生严重漏失、压差卡钻等复杂情况,绒囊钻井液恰好能够解决低压漏失层漏失问题。国内应用绒囊钻井液最深井是辽河油田2015年施工的曙古172井^[4],从3900 m开始使用,密度 $0.92\sim 0.94\text{ g/cm}^3$,完钻井深4684 m,压力43 MPa,温度 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。普光303-4井应用井段约在4800~5115 m,绒囊钻井液是否可行需要进行论证。

2004年,秦国鲲鹏等^[9]依据商985-平5井实测数据,建立“温度-井深(压力)关系”,对泡沫钻井液动密度随井深变化进行了测定,见图2。从图2中可以看出,泡沫钻井液的动密度随井深的变化趋势可以分为三段:低压快速上升段、中间弯曲段、高压高温下降段。由于气泡内及气泡表面的各种力的综合影响,井深大于一定值后,温度升高引起的体积膨胀稍大于压力升高引起的体积缩小,泡沫钻井液的动密度会稍有下降,并且泡沫钻井液动密度始终小于 1.00 g/cm^3 的,能够满足钻井的要求。3765 m深度压力37.25 MPa、温度 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$,相当于普光303-4井飞一、二段井深5000 m对应的温压。

磨80-C1井^[10]是磨溪气田的一口侧钻水平井,侧钻段2564~2906 m,井底垂深2750 m。目的层雷一段压力系数降为0.8左右,修井漏失严重。针对侧钻水平段孔隙裂缝发育、地层压力系数低、钙侵、矿化度高的问题,侧钻段采用绒囊钻井液。该井于2009年施工,现场应用表明,绒囊钻井液流变性能稳定,密度调节范围大,在 $0.70\sim 1.20\text{ g/cm}^3$,随钻封

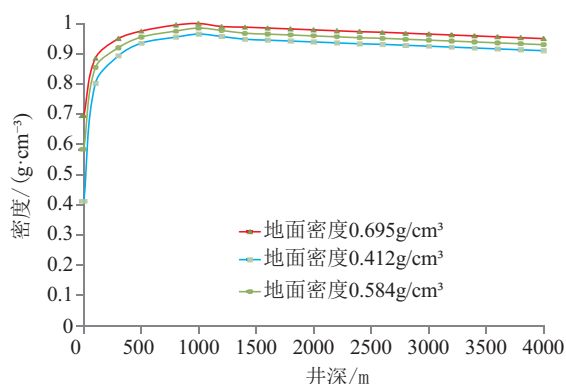


图2 泡沫钻井液密度与井深的关系

堵地层。现场利用现有设备加入专用处理剂即可配成绒囊钻井液且维护无需特殊处理,与原聚磺井浆混合后施工,全井无明显漏失。水平段钻进, $\rho=1.05\sim 1.07\text{ g/cm}^3$, $FV=48\sim 55\text{ s}$, $FL=3.8\sim 5\text{ mL}$, $PV=13\sim 16\text{ mPa}\cdot\text{s}$, $YP=14\sim 17\text{ Pa}$,润滑性良好,起下钻钻具摩阻始终保持在 $40\sim 100\text{ kN}$ 之间。

2012年,段慕白等^[11]研究指出,泡沫质量只能在合适的范围(75%~95%)才能应用于钻井工程中,当泡沫体积分数(泡沫质量)过低时,泡沫体系不稳定,从而失去作为钻井流体的价值。泡沫质量为70%、80%、90%的泡沫钻井深度分别为2000~2500、4000~4500、4500~5000 m。所以,在一定范围内(75%~95%)泡沫质量越大越有利于泡沫钻井工艺的实施。

2013年,王金凤等^[12]对磨80-C1井2500~6000 m井深应用水基绒囊钻井液当量静态密度进行了预测,见图3。从图3可以看出,2500~6000 m范围内,多元回归法和BP神经网络法两种方法预测结果均显示绒囊钻井液密度能够继续降低,并在6000 m仍保持一定密度,表明绒囊未在高温高压下被压缩成连续相,证明绒囊结构抗压缩能力强,能满足高温高压深井作业防漏堵漏要求。

绒囊钻井液在曙古172井^[4]现场应用到4684 m,其温度 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 已经超过了普光303-4井长兴组井深5115 m对应的 $125.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2016年4月,绒囊流体活塞修井技术在普光气田试用^[13],成功完成高含硫井X405井修井作业, H_2S 含量的纪录提升至 18 g/L 。这是该技术第一次在普光气田应用于高含硫气井。X405井深5005 m,于2006年投产,现气藏压力系数0.62。普光气田深部碳酸盐岩地层天然裂缝、溶洞与改造后人工裂缝

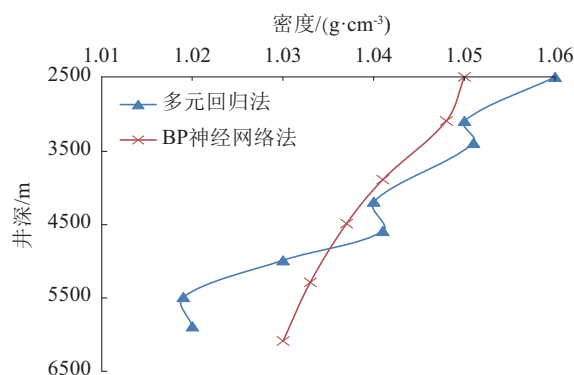


图3 两种不同数学方法得出2500 m以深绒囊钻井液静态当量密度预测值对比

结构共存,井筒与地层形成压差时成为漏失通道。前期使用清水压井漏失严重,后选择绒囊流体活塞修井技术实施压井作业,正挤绒囊流体形成稳定段塞高度1875 m,井口不放压条件下,持续60 d控制井底气体无上窜,为后续作业提供安全作业井筒环境。后续在DW-3^[14]、D5-Z^[15]等井使用。

地质条件相同的井深、压力、温度、高含硫条件下,既然普光气田X405、DW-3、D5-Z等井修井作业中能应用成功,没有发生漏失和污染,自然也能应用于普光303-4井钻井作业。

选定用于普光303-4井的绒囊钻井液地面密度要求在 $0.80\sim 0.85\text{ g/cm}^3$,用在飞一、二段欠压层,主要是利用其防漏和封堵功能。即使是使用绒囊钻井液,也不能保证不漏失,但可以降低钻井液的漏失速率和漏失量。该体系地面密度要求在 0.80 g/cm^3 以上,当密度低于该值时,泵效率降低,对泵压及排量有一定的影响。

5 泡沫或绒囊技术与堵漏技术的结合应用

5.1 案例研究

2008年,刘德胜等^[16]将随钻堵漏技术(果壳、云母)与抗钙聚磺泡沫钻井液结合,用于伊朗裂缝性高含硫枯竭油气层钻井,在钻井过程中出现放空的情况下,顺利完成MIS油田的V-1井。井深939 m,密度 $0.97\sim 1.03\text{ g/cm}^3$,地层压力系数0.43。

2015年,王健等^[17]使用微泡沫低固相聚合物体系和随钻堵漏剂CLPA-1,解决了辽河油田冷家老区块地层亏空、胶结性差、存在微裂缝等二次开发中产生的井漏难题。冷42-41-164CH井采用密度为 1.14 g/cm^3 的聚合物钻井液钻进至井深1467 m

发生漏失,钻井液失返,堵漏施工2次。堵漏成功后,加入发泡剂改型为泡沫聚合物钻井液,将密度降到 1.08 g/cm^3 继续钻进,发现仍有渗漏,再将密度降至 1.05 g/cm^3 ,配合1% CLPA-1堵漏剂,渗漏消失。此后,在相同区块的冷43-38-662CH井进入油层后直接改为微泡沫随钻堵漏钻井液体系,施工过程中再未出现复杂情况,共应用16口井。

2020年,曾浩等^[15]使用绒囊修井液固态复合封堵技术用于普光气田P2-Y井,满足了普光气田深部气层大尺度漏失通道中封堵性与经济性双重要求,扩展了绒囊流体应用领域。P2-Y井完钻层位长兴组,垂深达6000 m,修井作业前地层压力系数0.35。绒囊修井液封堵低压气层可行,但封堵大尺度通道用量过大,为此,引入固态堵剂辅助绒囊修井液降低流体用量。鉴于邻近D5-Z井使用 120 m^3 绒囊修井液封堵起效,但有效封堵周期较短,先以 60 m^3 清水携带 4 m^3 规格100目粉陶砂注入地层后,跟进 80 m^3 绒囊修井液,井口泵压增幅达5 MPa,顺利建立循环,达到预期目标。

5.2 普光303-4井绒囊钻井液方案

如前文所述,在曙古172井中,绒囊钻井液实际应用井深到了4684 m,在磨80-C1井预测可应用到井深6000 m,在普光气田P2-Y井中绒囊复合固态封堵修井液技术实际应用井深到了6000 m,而普光303-4井设计应用井深在4800~5115 m,室内研究与现场应用均表明,绒囊钻井液能够满足该井钻井防漏堵漏要求。

根据以上分析,普光303-4井选用绒囊钻井液,考虑到在高压下绒囊已压缩到很小,结合随钻封堵防漏的成功经验,为保证防漏堵漏成功率,可选用绒囊钻井液+1%双膜承压剂施工。

据此认为,采用绒囊钻井液+随钻封堵的方式钻穿飞一、二段是完全可行的。钻过后,到长兴组前,可以用上开次密度 1.35 g/cm^3 的钻井液直接混入绒囊浆中,用 $1.17\sim 1.25\text{ g/cm}^3$ 继续钻进。

6 结论

(1)钻飞一、二段压力系数0.60~0.70地层,若使用常规水基低密度 $1.03\sim 1.05\text{ g/cm}^3$ 的钻井液钻井,漏失量可能会较大,污染正在开发的主力层系。

(2)在飞一、二段欠压层钻进时采用低密度钻井液,首选绒囊钻井液。

(3)室内研究与现场应用表明,绒囊钻井液可以满足普光井深5000 m欠压地层的需要,并可继续提高密度钻井。

(4)采用绒囊钻井液+随钻封堵的方式钻穿飞一、二段是完全可行的。钻过后,到长兴组前,可以用上开次密度 1.35 g/cm^3 的井浆直接混入绒囊浆中,用 $1.17\sim 1.25\text{ g/cm}^3$ 继续钻进。

致谢:感谢张璐在英文翻译方面提供帮助。

参考文献:

- [1] 王茂成,肖和,肖达士,等.低密度白油基钻井液在欠平衡钻井中的应用[J].科技创新导报,2011,27(19):47-48.
- [2] 杨景利,薛玉志,张斌,等.分1井大井眼空气可循环泡沫钻井液技术[J].钻井液与完井液,2007,24(S1):86-88,130-131.
- [3] 张考.欠平衡钻井技术在茨119井中的应用[J].中外能源,2014,19(5):63-66.
- [4] 吴永川.微泡沫钻井液的发展史与特点[J].化工管理,2024,(12):73-76.
- [5] 匡立新,郑烜,袁明进,等.延平1水平井煤层气绒囊钻井液实践[J].天然气与石油,2012,30(4):39-42.
- [6] 郑力会,孔令琛,曹园,等.绒囊工作液防漏堵漏机理[J].科学通报,2010,55(15):1520-1528.
- [7] 郑力会,左锋,王珊,等.国内可循环泡沫类钻井液应用现状[J].石油钻采工艺,2010,32(1):10-16.
- [8] 赵永刚,强晓光,崔健,等.冀东油田水平井自匹配绒囊修井液暂堵冲砂技术[J].钻井液与完井液,2012,29(5):89-91.
- [9] 秦国鲲,耿宏章,刘延明,等.泡沫钻井液密度随井深变化关系模拟研究[J].石油钻探技术,2004,32(5):22-24.
- [10] 胡永东,赵俊生,陈家明,等.磨80-C1侧钻井水平井绒囊钻井液实践[J].钻采工艺,2013,36(1):110-113.
- [11] 段慕白,冯宗伟,张冬明,等.泡沫钻井液临界条件研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(5):59-61.
- [12] 王金凤,杨晨,毛邓添,等.BP神经网络法预测水基绒囊钻井液当量静态密度[J].石油钻采工艺,2013,35(6):32-35.
- [13] 魏攀峰.绒囊流体活塞修井技术作业井再创 H_2S 含量记录[J].天然气工业,2016,36(9):101.
- [14] 曾浩,彭睿,郑勇,等.耐硫化氢微囊压井液在普光低压气井修井中的应用[J].非常规油气,2018,5(6):80-86.
- [15] 曾浩,朱方辉,张文昌,等.普光气田绒囊修井液结合固相堵剂暂堵深部低压气层[J].石油钻采工艺,2020,42(5):652-656.
- [16] 刘德胜,罗淮东,董大康,等.伊朗MIS油田裂缝性高含硫枯竭油气层钻井液技术[J].钻井液与完井液,2008,25(5):5-8.
- [17] 王健,洪伟,关键,等.泡沫随钻堵漏钻井液体系[J].钻井液与完井液,2015,32(5):23-26.

(编辑 王文)